

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
Fakulta strojní

Katedra energetiky

VÝZKUM VLIVU SKLADBY KOMUNÁLNÍHO ODPADU VYUŽÍVANÉHO V ZEVO NA TAVITELNOST POPELA

Autoreferát disertační práce

Studijní program:	P2346 Strojní inženýrství
Studijní obor:	2302V006 Energetické stroje a zařízení
Školitel:	prof. Ing. Helena Raclavská, CSc.
Doktorand:	Ing. Karla Kryštofová

Ostrava 2018

Anotace disertační práce:

KRYŠTOFOVÁ, Karla. *Výzkum vlivu složení komunálního odpadu využívaného v ZEVO na tavitelnost popela.* Katedra energetiky, Fakulta strojní, VŠB - TU Ostrava, 105 stran, 38 obrázků, 44 tabulek. Školitel: prof. Ing. Helena Raclavská, CSc.

Předkládaná disertační práce se zabývá vlivem složení spalovaného materiálu, v tomto případě separovaného komunálního odpadu, v ZEVO - zařízení pro energetické využití odpadů na tavitelnost popela. Dále je v práci řešeno energetické využití komunálního odpadu i jiným způsobem než jen jeho samostatným spalováním. Kombinované spalování vhodným způsobem využívá energetickou kapacitu odpadů spolu s dodáním ještě jiného zdroje energie, kterým může být uhlí, nebo také cíleně pěstovaná biomasa. Toto kombinované spalování by se mohlo v budoucnosti uplatnit i v jiných energetických zařízeních. Na téměř padesáti různých materiálech byly provedeny chemické a termochemické analýzy, jako jsou výhřevnost, vlhkost, elementární analýza, obsah popelovin, prchavé hořlaviny a fixního uhlíku, dále byl proveden vodný výluh, analýza na RTG fluorescenci a v neposlední řadě byly také provedeny zkoušky tavitelnosti popela z jednotlivých materiálů a jejich směsí při vzrůstající teplotě.

Klíčová slova: směsný komunální odpad, ZEVO, vznik aglomerátů, indexy spékání

Annotation of Dissertation Thesis:

KRYŠTOFOVÁ, Karla. *The research of municipal waste composition utilized by technology of waste-Zevo on ash melting point.* Department of Power Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, VŠB - TU Ostrava, 40 pages, 1 figure, 4 tables. Tutor: prof. Ing. Helena Raclavská, CSc.

The present dissertation deals with the influence of combustion material composition, in this case separated municipal waste, in WtE – waste to energy plants on ash fusibility. Also the energy use of municipal waste is solved in other way than its own combustion. Combined combustion appropriately utilizes the energy capacity of the waste together with the supply of another source of energy, which may be coal or also the targeted cultivation biomass. This combined combustion could be applied in other power plants in the future. Approximately 50 different materials were subjected to chemical and thermochemical analyzes such as calorific value, moisture, elemental analysis, ash content, volatile and fixed carbon, water extraction, analysis on RTG fluorescence and, last but not least, ash melting tests from individual materials and mixtures thereof at increasing temperature.

Keywords: mixed municipal waste, WtE, forming of agglomeration, sintering indexes

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala své školitelce prof. Ing. Heleně Raclavské, CSc. za odbornou pomoc, cenné rady a neskutečnou trpělivost při zpracování této disertační práce. A chtěla bych poděkovat Ing. Silvii Bielešové za spolupráci při provádění analýz.

Obsah

1	ÚVOD	6
2	CÍL PRÁCE	7
3	KOMUNÁLNÍ ODPAD	8
3.1	Současný stav nakládání s odpady v ČR	8
3.2	ZEVO.....	9
4	ENERGETICKÉ VLASTNOSTI SKO.....	11
4.1	Metody stanovení tavitelnosti popela	11
4.2	Indexy spékavosti	12
4.3	Základní technologie pro energetické využití SKO	13
5	METODIKA PRÁCE.....	16
6	VLASTNOSTI AGLOMERÁTŮ	17
6.1	Vodný výluh	17
6.2	Popeloviny, prchavá hořlavina, fixní uhlík, vlhkost.....	19
6.3	Indexy spékání	21
7	APLIKACE VÝSLEDKŮ	24
7.1	Identifikace příčin vzniku aglomerátů	26
8	ZÁVĚR	28
8.1	Přínos pro vědní obor	30
8.2	Přínos pro praxi	30
8.3	Doporučení na další výzkum	30
9	CONCLUSIONS.....	31
9.1	Contribution for scientific discipline	33
9.2	Contribution for practice	33
9.3	Recommendation for further research	33
10	POUŽITÁ LITERATURA.....	34
11	SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ	36
12	VLASTNÍ PUBLIKACE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE	37
	ŽIVOTOPIS	38
	CURRICULUM VITAE	39

Seznam použitého značení, symbolů a zkratek

ZNAČKA	VÝZNAM	JEDNOTKA
AFI	Ash Fusibility Index; Index tavitelnosti popela	-
AOX	Adsorbable Organically bound Halogens; Halogenované organické sloučeniny	-
BRKO	Biologicky rozložitelný komunální odpad	-
DT	Deformation Temperature; Teplota deformace	°C
FT	Flow Temperature; Teplota tečení	°C
HT	Hemisphere Temperature; Teplota tání	°C
IDT	Initial Deformation Temperature; Počáteční teplota deformace	°C
ISE	Ion Selective Electrode; Iontově selektivní metoda	-
PVC	Polyvinylchlorid	-
SKO	Separovaný komunální odpad	-
ST	Sphere Temperature; Teplota měknutí	°C
TAP	Tuhé alternativní palivo	-
TGA	Thermogravimetric Analysis; Termogravimetrická analýza	-
TOC	Total Organic Carbon; Celkový organický uhlík	kg · rok ⁻¹
US EPA	United States Environmental Protection Agency; Agentura pro ochranu životního prostředí USA	-
XRF	X-Ray Fluorescence; Rentgenová fluorescence	-
ZEVO	Zařízení pro energetické využití odpadů	-

1 ÚVOD

Přestože dnešní energetice zatím vládou neobnovitelné zdroje energie, stále častěji se začíná mluvit o jiných zdrojích. Pod těmi si představujeme zdroje obnovitelné, ale také například dále nevyužitelný odpad. Jejich využití je možné například v ZEVO – zařízení pro energetické využití odpadů. ZEVO je možnost jak odpad energeticky přeměnit na využitelnou energii, například pro ohřev vzduchu nebo vody, výrobu elektrické energie, a podobně. Je to možnost jak výhodně využít vzniklý komunální odpad a snížit množství skládkovaného odpadu. A také snížit množství využívaných fosilních paliv a jiných neobnovitelných zdrojů energie.

V ZEVO je SKO - separovaný komunální odpad spalován při teplotách vyšších než 900 °C. Základem této linky jsou převážně kontinuálně plněné kotle (nepřetržitý provoz) s válcovými rošty a vícestupňovým čištěním spalin. Uvolněné teplo je použito pro vytvoření páry, která je přiváděna do kogenerační jednotky, kde je po průchodu turbínou převedena na elektrickou energii a poté dodávána do rozvodné sítě. Výroba elektrické energie spalováním SKO je finančně méně náročná než výroba energie v uhelných elektrárnách, které jsou v České republice zatím nejrozšířenější. Veškerá ostatní paliva využívaná k energetickým účelům, mezi které patří také komunální odpad, podílí se na výrobě elektrické energie v ČR jen asi 0,3 %. Dominantním zdrojem zůstává uhlí, ať černé nebo hnědé s více než 50 %.

Komunální odpad má téměř nevyčerpatelný potenciál využití v energetice, ale zatím se jeho použití příliš nerozšířilo. V ČR jsou zatím jen 4 provozovny, které spalují komunální odpad pro energetické účely, jsou to Praha - Malešice, Brno - Komárov, Liberec a Chotíkov u Plzně. Jejich celková kapacita je 749 tisíc tun komunálního odpadu ročně, přičemž se v ČR v roce 2016 vyprodukovalo 3,6 miliónů tun komunálního odpadu. Z tohoto množství bylo 45 % odpadů uloženo na skládky.

V současnosti se do popředí zájmů dostává kombinované spalování, které vhodným způsobem využívá nevytříděný a nezpracovatelný komunální odpad. Vzhledem k blížícímu se termínu zákazu skládkování směsného komunálního odpadu a recyklovatelných odpadů, který začne na území ČR platit v roce 2024, je kombinované spalování jedním z nejvhodnějších řešení. V této práci je ukázáno, jak kombinované spalování SKO a dalších materiálů chemicky a termochemicky působí na energetická zařízení.

2 CÍL PRÁCE

Hlavním cílem doktorské práce je určení teplot tavitelnosti popela z jednotlivých materiálů obsažených v komunálním odpadu, které mohou být použity v ZEVO nebo v jiných energetických zařízeních jejich kombinovaným spalováním. Pro splnění tohoto cíle jsem stanovila tyto dílčí úkoly:

- Shrnutí současného stavu řešené problematiky nakládání s komunálním odpadem v ČR i ve světě a seznámení s nejčastějšími způsoby likvidace odpadů.
- Provedení literární rešerše pro určení „správného postupu“ – metodiky identifikace spékavosti popela (chemickým stanovením i výpočtem) pro biomasu.
- Testování složek obsažených v komunálním odpadu z hlediska energetických vlastností a jeho celkového chemického složení a složení popela. Identifikace způsobu vazby prvků ovlivňujících spékavost.
- Chemické a termochemické analýzy všech vzorků popela.
- Identifikace příčin vzniku aglomerátů v provozních zařízeních.

Metody použité pro doktorskou práci:

Stanovení tavitelnosti popela podle normy ČSN ISO 540 a podle metodik uváděných v literatuře (biomasa). Metody fázové mineralogické analýzy: RTG-difrakce, scanovací elektronová mikroskopie (SEM) + energiově disperzní analýza částic (EDX) s využitím zařízení ICT, VŠB-TU Ostrava.

3 KOMUNÁLNÍ ODPAD

Z pohledu dělení odpadů se řadí komunální odpad mezi ostatní odpady. Nejběžnějším příkladem komunálních odpadů je směsný komunální odpad, který tvoří zbytkový a nevytříděný odpad z domácností, vytříditelné složky komunálního odpadu jako jsou sklo, papír, plasty a kovy, ale také objemný odpad například starý nábytek, koberce, linolea, zařízení koupelen, kuchyňské linky a drobný stavební odpad. Součástí komunálního odpadu jsou také nebezpečné odpady, které jsou odevzdávány ve sběrných dvorech, mezi ně patří syntetické barvy, laky a ředidla, baterie a autobaterie, ropné produkty, lepidla a pryskyřice, zářivky a žárovky, lednice a mrazáky. Dále se v komunálním odpadu vyskytuje biologicky rozložitelný komunální odpad BRKO, jehož původcem může být obec nebo soukromá osoba a tvoří jej materiál z údržby městské zeleně nebo odevzdání zbytků z údržby zeleně na soukromém pozemku. Komunální odpady se na celkové produkci všech odpadů v ČR dlouhodobě podílejí cca 17 %. [1, 2]

Komunálním odpadem je podle zákona 185/2001 Sb. o odpadech a o změně některých dalších zákonů, ve znění pozdějších předpisů, veškerý odpad, který vzniká na území obce činností fyzických osob, a který je uveden ve vyhlášce 93/2016 Sb. o Katalogu jako komunální odpad, pod katalogovým číslem 20, ale s výjimkou odpadů, který vznikají u fyzických osob oprávněných k podnikání nebo u osob právnických. Jako komunální odpad je v Katalogu odpadů řazen i odpad podobný komunálnímu odpadu z domácností, který vzniká na území obce, a jehož původcem je fyzická osoba oprávněná k podnikání nebo právnická osoba. Zákon o odpadech stanoví, že původcem odpadu je obec. [3, 4]

3.1 Současný stav nakládání s odpady v ČR

Cíle pro hospodaření a nakládání s odpady a opatření pro jejich dosažení se v dnešní době v České republice řídí podle Plánu odpadového hospodářství ČR pro období 2015 – 2024, který byl vydán formou nařízení vlády. V tomto Plánu jsou pro komunální odpad stanoveny tyto cíle:

- předcházení vzniku odpadů a snižování měrné produkce odpadů,
- minimalizace nepříznivých účinků vzniku odpadů a nakládání s nimi na lidské zdraví a životní prostředí,
- udržitelný rozvoj společnosti a přiblížení se k evropské „recyklační společnosti“,
- maximální využívání odpadů jako náhrady primárních zdrojů a přechod na oběhové hospodářství,
- do roku 2015 zavést tříděný sběr minimálně pro odpady z papíru, plastů, skla a kovů,
- do roku 2020 zvýšit nejméně na 50 % hmotnosti celkovou úroveň přípravy k opětovnému použití a recyklaci alespoň u odpadů z materiálů jako je plast, papír, sklo a kovy, odpady pocházející z domácností a případně i další odpady, pokud jsou podobné odpadům pocházejících z domácností. [5, 6]

Tyto cíle vycházejí ze směrnice Evropského parlamentu a Rady 2008/98/ES o odpadech. S Plánem odpadového hospodářství ČR musí být v souladu také plány odpadového hospodářství krajů a plány odpadového hospodářství obcí v ČR. Oblast nakládání s odpady zahrnuje také příhraniční přepravu odpadů z ČR a do ČR či přes její území a hranice. Tato přeprava je upravena také předpisy EU - Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) č. 1013/2006, o přepravě odpadů, ve znění pozdějších předpisů, a je povolována v rámci správního řízení s minimálními dopady na životní prostředí. [7, 8]

Produkce komunálního odpadu v ČR vzrostla za posledních deset let o více než 34 %. Zatímco v roce 2006 bylo na našem území vyprodukováno 2 659,2 tis. t komunálního odpadu, v roce 2016 to bylo už 3 579,6 tis. t. V období mezi roky 2006 – 2016 se snížil podíl skládkování odpadů z původních 77 % na 50 %, což je ale stále velmi vysoké procento, vzhledem k tomu, že byla v roce 2017 přijata novela zákona o odpadech, ve které se uvádí, že od roku 2024 bude v ČR zakázáno skládkovat využitelné, recyklovatelné a směsné komunální odpady. Další využití odpadů jako paliva nebo jiným způsobem k výrobě energie vzrostlo přibližně pouze o 1 % z původních 15 % na 16 %. Na stejné úrovni 0,1 % zůstalo také spalování odpadů bez energetického využití. Kompostování komunálního odpadu vzrostlo z 0,9 % na 6,9 %. A prudce se zvýšilo také využití recyklace ze 7 % na stávajících 27 %. [9, 10]

V roce 2024 v ČR začne platit zákaz skládkování směsného komunálního odpadu a recyklovatelných odpadů. V souladu s platnou legislativou EU bude nakládání s odpady rozřazeno do takzvané „Hierarchie odpadů“ (Obrázek 1) podle plánovaného řešení. Součástí tohoto plánu bude i energetické využití odpadů. [11]



Obrázek 1: Hierarchie odpadů [11]

3.2 ZEVO

Zařízení pro Energetické Využití Odpadů (ZEVO) funguje na stejném principu jako spalovna odpadů s tím rozdílem, že se zde vzniklá energie dále využívá. Tato energie je následně zdrojem pro výrobu páry k pohonu parních turbín nebo je využívána v centrálních systémech zásobování teplem ve městech. Takto získaná energie může být předávána do elektrické rozvodné sítě. Případně se tepelná i elektrická energie vyrábí společně v kogenerační jednotce. Rozdíl mezi ZEVO a spalovnou je dán i zákonem č. 185/2001 Sb. zákon o odpadech a o změně některých dalších zákonů ve znění pozdějších předpisů. [11]

Pro ZEVO platí velmi přísná česká i evropská legislativa, která připouští jen minimální hodnoty vypouštěných emisí do životního prostředí. V porovnání s klasickými výrobami energie, jako jsou například uhelné elektrárny, jsou ZEVO daleko šetrnější k lidskému zdraví i k životnímu prostředí. Navíc takto vyrobená energie nejen snižuje

využívání neobnovitelných zdrojů surovin, ale také snižuje hmotnost a objem odpadů. Zbytkový odpad po spalování lze využít jako druhotné suroviny, například ve stavebnictví. Většina provozovaných ZEVO je přizpůsobených pro přijímání směsného komunálního odpadu a jemu podobnému živnostenskému odpadu podle platné legislativy ČR a EU.

Energetické využití odpadů je součástí moderního odpadového hospodářství nejen v ČR a to hned z několika důvodů:

- využití zbytkového odpadu - který už nelze zpracovat jinak,
- výroba energií s přísnými parametry na použité technologie,
- úspora neobnovitelných paliv i surovin,
- snížení objemu odpadů až o 90 %,
- odstranění většiny nebezpečných vlastností odpadů. [11]

4 ENERGETICKÉ VLASTNOSTI SKO

Energetické vlastnosti komunálních odpadů jsou důležité především z hlediska výběru vhodné technologie pro jejich následné energetické využití. Mezi tyto vlastnosti se standardně řadí:

- výhřevnost,
- vlhkost,
- elementární analýza,
- obsah popelovin v palivu, prchavá hořlavina a fixní uhlí
- tavitelnost popela,
- metody stanovení tavitelnosti popela,
- emise.

4.1 Metody stanovení tavitelnosti popela

Stanovení tavitelnosti popela se provádí podle jednoho ze čtyř postupů. Všechny používané normy mají velmi podobný základ pro stanovení teplot tavení popela, ale liší se v několika parametrech, jako jsou příprava vzorků popela a způsob přípravy zkušebních tělísek. [9]

ČSN 44 1359 – norma pro zkoušení tuhých paliv, byla zavedena normou RVHP s označením ST SEV 3430-81, která byla v roce 2000 nahrazena mezinárodním standardem ISO 540, který se stal českou normou ČSN ISO 540.

Příprava vzorků: vzorek pod 0,0212 mm se ohřívá na 500 °C během 60 minut, izoterma je 30 - 60 minut, následuje ohřev na 815 °C s izotermou minimálně 60 minut. Drcení popela pod 0,075 mm. Forma, lis ani postup pro přípravu zkušebního tělíska není popsán. Jehlan výšky 19 mm, krychle o hraně 3 - 7 mm, válec o výšce = průměr = 3 - 9 mm nebo komolý kužel výšky 4 mm. Pomocné látky: dextrin, voda, vazelína. Sušení na vzduchu, odstranění organické hmoty ohřevem na 815 °C. Vzorek se upravuje v oxidační, redukční i poloredukční atmosféře. [12]

ČSN P CEN/TS 15370-1 Tuhá biopaliva - Metoda pro stanovení teploty tání popela - Část 1: Metoda stanovení charakteristických teplot.

Příprava vzorků: vzorek pod 1mm (pokud je nutné pod 0,25mm) se po určení vlhkosti vysuší a dále se ohřívá při rychlosti 5 °C · min⁻¹ do 250 °C, izoterma 60 minut, následuje ohřev na 550 °C během hodiny a izoterma 120 minut. Při pochybách se vzorek rozdělí na menší části, které se žijí dalších 30 minut nebo je použita voda nebo dusičnan amonný (NH₄NO₃) a vzorek je opětovně ohřát na 550 °C. Popel je drcen na rozměr pod 0,075 mm. Forma ani lis nejsou popsány. Vtláčecí tlak lisu 1,5 N · mm⁻², váleček o výšce = průměr = 3 - 5 mm. Pomocné látky: dextrin (C₆H₁₀O₅)_n, voda (H₂O), etanol (C₂H₆O). Sušení není blíže popsáno a specifikováno. [13]

Ústavu pro výzkum a využití paliv a.s. v Praze zavedl další metodiku, kterou zpracoval **Kubant** – je založena na vizuálním pozorování tvarových změn zkušebního tělíska, od ostatních norem se ale liší jeho definice. Postupy se liší od předchozích dvou norem.

Příprava vzorků: vzorek pod 1 mm se ohřívá při rychlosti ohřevu $5\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ do teploty $250\text{ }^{\circ}\text{C}$, izoterma 60 minut, následuje ohřev na teplotu $550\text{ }^{\circ}\text{C}$, po celou dobu je zajištěn dostatečný přívod vzduchu a odtah prchavé hořlaviny přirozeným tahem. Izoterma 120 minut při $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nuceně se přivádí vzduch, popřípadě se zvyšuje podíl O_2 . Sítování na normovaných sítěch s velikostí ok $0,2\text{ mm}$, nadsítná část se rozemele tak, aby prošla oky. Lis, postup i forma pro přípravu zkušebního tělíska jsou definovány - vtláčecí tlak lisu $0,15\text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$. Válec o výšce = průměr = 3 mm . Pomocné kapaliny: voda. Sušení při $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ a následně při $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ (při velkém podílu draslíku a síry až při $410\text{ }^{\circ}\text{C}$). Zkušební atmosféra je poloredukční nebo oxidační. [67]

ČSN ISO 540 Uhlí a koks - Stanovení tavitelnosti popela poskytuje informace o tavení popela z uhlí při zvyšující se teplotě – změna tvaru zkušebního tělíska. Standardizovaná metoda je založena na metodě Segerova kužele.

Příprava vzorků: vzorek pod 1mm se po určení vlhkosti vysuší a ohřívá se na $815\text{ }^{\circ}\text{C}$, izoterma 30 minut, následuje ohřev do teploty $1549\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lis není definován, postu i forma zkušebního tělíska jsou specifikovány. Kužel (jehlan) o hraně podstavy 5 mm a výšce 15 mm . Pomocné látky: voda, dextróza.

Podle této normy je změna tvaru zkušebního tělíska charakterizována čtyřmi různými teplotami:

- Teplota deformace - první příznaky zaoblení hrotu pozorovaného zkušebního tělíska.
- Teplota měknutí - teplota, při které je výška a šířka základny pozorovaného jehlanu stejná.
- Teplota tání - pozorované těleso vytváří tvar přibližně polokoule, výška se rovná polovině průměru základny.
- Teplota tečení - popel se rozteče na podložce ve vrstvě, jejíž výška je třetina výšky pozorovaného tělesa při teplotě polokulovitého tvaru. [12]

4.2 Indexy spékavosti

Výpočty indexů spékavosti se dnes používají jako doplňující parametry k určení pravděpodobnosti tvorby inkrustů na teplosměnných plochách spalovacích zařízení, především pro uhlí a biomasu.

Index teploty T (250 °C)

Index spékavosti popela podle teploty $T_{250\text{ °C}}$ se počítá pomocí obsažených oxidů SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 a CaO . Tyto oxidy se násobí danými koeficienty. [15]

Index teploty měknutí - index ST

V minulosti byly výpočty určeny k posouzení vzniku inkrustů při spalování biomasy, ale byly prováděny podle výpočtů určených pro uhlí. Yu et al. [14] vytvořili nový model pro tyto výpočty určené přímo pro biomasu, který je postaven na určení indexu spékavosti, kdy se určuje poměr mezi kyselými oxidy SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 a oxidy zásaditými CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O . [16, 17]

Index IDT

Dalším hodnotícím parametrem může být IDT - počáteční teplota deformace (Initial Deformation Temperature), což je index pro hodnocení pravděpodobnosti vzniku inkrustů. Tato teplota se stanovuje v laboratoři. Obecně lze říci, že hodnota IDT je tím vyšší, čím méně je v popelu K_2O . Změřená hodnota IDT pak určuje pravděpodobnost vzniku inkrustů. [18, 19, 20]

Index AFI

Po zjištění hodnoty indexu IDT a HT lze odvodit index tavitelnosti popela AFI, který je považován za jeden z nejdůležitějších pro chování popela z biomasy, protože jeho hodnoty pravděpodobnosti tvorby inkrustů jsou velmi blízké skutečnému chování paliv ve spalovacím zařízení. [21, 22]

Index poměru zásada - kyselina

Tento index je založen na výpočtu poměru mezi Fe_2 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O a mezi oxidy SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 . Výpočet tohoto indexu určuje míru spékavosti popela. [15]

Index oxidu křemičitého

Tento index se počítá na základě zastoupení oxidu křemičitého a dalších oxidů - Fe_2O_3 , CaO a MgO . [15]

4.3 Základní technologie pro energetické využití SKO

Energetické využívání odpadů probíhá nejčastěji prostřednictvím těchto spalovacích technologií:

Roštové spalování

Jedná se o nejrozšířenější používanou metodu, spalování paliva probíhá na roštu a v prostoru nad vrstvou paliva. Mezi její hlavní přednosti patří dosahování vysokých teplot

(až 1400 °C) a dlouhá doba setrvání paliva, nevýhodami jsou nízká účinnost spalování, vyšší produkce emisí, tvorba inkrustů na teplosměnných plochách a kolísání výhřevnosti. [23, 24]

Fluidní spalování

Principem je spalování ve fluidní vrstvě, také je tento proces nazýván spalování ve vzhledu, do spalovacího prostoru je přiváděn vzduch. Proces hoření je poměrně rychlý a snadno regulovatelný. Spalovací teploty jsou 700 °C – 900 °C. Tato technologie se používá především pro spalování uhlí, protože velikost částic použitého materiálu by měla být maximálně 150 mm. [23, 24]

Plazmové zplyňování

Odpad je speciálním zařízením dávkován do prostoru plazmového reaktoru. V reaktoru se nachází plazmový hořák, teplota plamene dosahuje až 4000 °C, kde dochází k rozkladu organických i částí anorganických materiálů na jednoduché plynné a kapalné sloučeniny. Výsledkem je syntézní plyn tvořený především H_2 a CO , který je vysoce hořlavý a následně se využívá jako palivo v kogeneračních jednotkách. Složky odpadu, které se nerozložily, jsou roztaveny a na dně reaktoru vytvoří strusku, která se kvůli chemické stabilizaci následně vitrifikuje. [25]

Pyrolýza

Rozklad složitých organických látek za vzrůstající teploty bez přístupu vzduchu (kyslíku) na jednoduché organické a anorganické látky. Podle maximální teploty se dělí do tří kategorií:

- nízkoteplotní (< 500 °C),
- středněteplotní (500 – 800 °C)
- vysokoteplotní (> 800 °C). [26]

Termickým rozkladem vstupního materiálu vznikají:

Pevný karbonizační zbytek

Vyjadřuje množství uhlíku, který vznikne po vypaření odpařitelných podílů paliva a po následné mineralizaci bez přístupu vzduchu. Charakterizuje dispoziční paliva k tvorbě koksovitých látek. Vyjadřuje se v hmotnostních procentech, hm. %. [27]

Kondenzát

Kapalný podíl, který vzniká, pokud je teplota spalin shodná s rosným bodem vodní páry, nebo nižší. Vzniká z vlhkosti obsažené v palivu. Odvádění kondenzátu z kotle musí být řešeno podle ČSN 75 6760 - Vnitřní kanalizace. Množství vyprodukovaného kondenzátu se obvykle uvádí v litrech za den. [28]

Pyrolýzní plyn

Lze využít pro výrobu tepelné a elektrické energie. Vzniká jako nezkondenzovaný zbytek přítomných plynů v anaerobní retortě, což je žáruvzdorná nádoba, v níž se provádějí chemické pochody. Plyn je vypírán před a v průběhu kondenzace, čištěn od zbytků síry a ochlazován na okolní teplotu. [29]

Organický kapalný produkt

Neboli pyrolýzní olej, lze stejně jako pyrolýzní plyn využít pro energetické účely spalováním v kogenerační jednotce. Vzniká kondenzací plynů v retortě a podle hustoty se dělí na lehký, střední a těžký. Frakční destilací lze získat extra lehký topný olej a lehký topný olej. Tyto oleje jsou velice žádanou surovinou a používají se jako náhrada za ropné produkty. [29]

5 METODIKA PRÁCE

Pro dosažení stanovených cílů disertační práce byla použita metodika, která se řídí následujícím postupem:

1. Provedení literární rešerše aktuálnosti řešené problematiky nakládání s komunálním odpadem v ČR i ve světě. Charakteristika nejdůležitějších energetických vlastností separovaného komunálního odpadu. Metody stanovení tavitelnosti popela především z uhlí, alternativách paliv a biomasy. Výpočet faktorů identifikujících tavitelnost a pravděpodobnost tvorby inkrustů biomasy podle literárních údajů. Shrnutí legislativy týkající se emisního znečištění a rešerše platných norem ČR pro zpracování vzorků paliv a popela.
2. Identifikace majoritních složek ve složení směsného komunálního odpadu. Stanovení chemického složení směsného komunálního odpadu a obsahu popelovin (vstupní materiál a po separaci jednotlivých složek) pro různá roční období ve vzorcích dodaných firmou OZO Ostrava s.r.o. a Skládkou Frýdek-Místek.
3. Separace majoritních složek ze směsného komunálního odpadu – provedení prvkové analýzy a určení energetických parametrů (výhřevnost, obsah popela stanovený při 815 °C a 550 °C, stanovení vodou vyluhovatelných chloridů a alkálií, obsah prchavé hořlaviny a vlhkosti).
4. Příprava vzorků popela spálením materiálu při různých teplotách (815 °C, 1050 °C a 1200 °C). Identifikace mineralogického fázového složení popela připraveného za různých teplot a stanovení majoritních oxidů. Stanovení tavitelnosti popela.
5. Sledování chování jednotlivých druhů spalovaného materiálu. Provedení analýzy aglomerátů vzniklých při kombinovaném spalování paliva a odpadů.
6. Výpočty parametrů určujících deformaci podle údajů v literatuře, charakterizace popela podle indexů ST, IDT, AFI, SiO₂ a indexu zásada-kyselina.
7. Ověření chování „směsi uhlí z OKR + předupraveného SKO“ po dodání vzorku od firmy INGEA, s. r.o. z hlediska spékavosti popela. Návrh optimálního složení „alternativního paliva“ s cílem zabránění problému se struskováním pro vybrané energetické zařízení v regionu (pravděpodobně Teplárna Karviná).
8. Případové studie – ENERGOSPOL, s.r.o. (spalování „Engineering wood“)

6 VLASTNOSTI AGLOMERÁTŮ

Mezi nejdůležitější vlastnosti aglomerátů patří jejich chemické složení, které je samozřejmě u různých paliv rozdílné. Patří mezi anorganickou složku paliva. Zkoumané aglomeráty pocházejí z různých materiálů a tyto materiály byly také spalovány v rozličných spalovacích zařízeních.

6.1 Vodný výluh

Vodný výluh pevného odpadu je roztok, který se připravuje smícháním odpadu s vodou ve stanoveném poměru a za stanovených podmínek, které jsou uvedeny v ČSN EN 12 457-4 (83 8005). Stanovený poměr se docílí odvážením množství původního předupraveného vzorku obsahujícího $100 \text{ g} \pm 1 \text{ g}$ sušiny a smícháním s 1000 ml destilované vody. Podmínky pro vodný výluh jsou dány: teplota $20 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$, 24 hodin smíchané pevné a kapalné fáze, následné oddělení fází membránovou filtrací přes filtry o velikosti pór $5 \text{ }\mu\text{m}$, sedimentace a centrifugace. Takto připravený výluh lze uchovávat bez konzervace ve tmě a chladu při teplotě $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ maximálně 1 měsíc. [30]

U všech použitých vzorků popela byly provedeny výluhy podle Vyhlášky MŽP č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů, a následně stanoveny některé z ukazatelů, které slouží pro zařazení vzorků do příslušné třídy vyluhovatelnosti. Výsledky výluhů všech vzorků popela jsou shrnuty v Tabulka 1.

Tabulka 1: Vodný výluh

Číslo vzorku	pH	Konduktivita	KNK ₄₅	Cl ⁻	(SO ₄) ²⁻	(PO ₄) ³⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		[mS · cm ⁻²]	[mmol · l ⁻¹]	[mg · l ⁻¹]						
671/17	11,07	12,42	63,490	107,51	905	0,218	146,3	2500	22,43	29,24
674/17	7,26	2,50	4,329	38,40	764	0,012	57,7	50	527,35	73,09
678/17	7,00	1,28	3,848	33,28	630	0,018	45,3	36	199,37	30,24
694/17	11,09	27,00	168,350	143,34	1725	5,643	115,9	4400	16,61	13,61
706/17	6,75	3,58	2,886	74,23	1535	0,001	194,1	145	573,18	90,73
712/17	6,75	2,77	1,443	33,28	1370	0,001	88,2	55	581,49	50,41
715/17	6,48	3,60	1,924	28,16	1550	0,001	111,8	95	610,56	186,50
723/17	11,12	10,23	46,180	87,91	955	0,116	78,1	720	955,30	109,88
733/17	5,88	22,00	1,924	6885,6	198	0,110	52,9	80	4859,6	22,68
739/17	10,60	13,06	81,770	81,91	1090	2,527	122,0	2400	13,29	59,48
777/17	5,90	19,48	1,443	6271,3	675	0,012	70,6	80	4402,7	45,37
783/17	5,66	24,30	0,962	7704,7	0,0	0,018	58,8	700	5025,7	45,37
789/17	6,66	1,56	1,443	113,65	645	0,018	11,8	15	348,89	50,41
796/17	11,05	8,95	47,140	148,46	110	0,011	42,7	2200	46,52	17,64
803/17	9,18	1,89	2,890	81,91	875	0,009	14,6	17	390,43	33,77

Číslo vzorku	pH	Kondukti vita	KNK ₄₅	Cl	(SO ₄) ²⁻	(PO ₄) ³⁻	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
		[mS · cm ⁻²]	[mmol · l ⁻¹]	[mg · l ⁻¹]						
809/17	10,43	11,67	79,850	127,99	376	2,413	78,1	2300	24,09	6,05
816/17	7,01	2,70	2,890	51,19	1255	0,034	112,2	100	493,44	117,95
822/17	9,48	11,44	100,050	220,13	765	2,153	47,6	2300	8,31	41,84
846/17	8,33	2,03	7,700	61,43	845	0,011	62,2	160	346,40	235,90
869/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
875/17	6,84	3,66	1,920	66,55	1630	0,051	134,2	89	648,78	138,11
881/17	10,83	5,34	25,970	76,790	12	0,003	30,5	1300	68,95	16,13
887/17	9,59	10,02	90,430	255,97	580	2,096	84,2	2300	9,14	5,55
896/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
930/17	8,34	3,75	29,820	97,27	860	0,431	63,4	980	37,38	34,28
947/17	11,10	9,77	40,400	81,91	980	0,006	57,3	610	943,67	85,69
1035/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1043/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1049/17	10,76	37,00	7,696	10162	0,0	0,202	158,8	650	7767	50,41
1069/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1097/17	11,04	7,02	30,780	87,03	0,0	0,020	51,2	1500	133,74	25,71
1103/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1127/17	10,76	14,99	26,940	1556,3	1310	0,051	182,9	3300	36,55	8,57
1133/17	10,01	3,94	8,660	127,99	1450	0,014	51,2	160	765,90	18,65
1141/17	11,33	9,42	22,607	33,28	825	0,006	64,7	355	631,33	246,99
1147/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1159/17	11,27	24,10	187,109	23,04	830	14,071	158,8	4100	8,31	35,28
1177/17	10,87	19,42	159,211	209,90	730	7,158	164,7	4800	8,31	15,12
1217/17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1228/17	10,15	4,00	10,580	71,67	1410	0,011	40,2	160	780,03	32,26
1237/17	9,32	2,65	0,962	46,08	1195	0,012	30,0	105	577,34	42,85
1257/17	11,75	33,80	169,312	358,36	1150	2,508	564,7	11000	37,38	40,32
1270/17	7,65	1,46	1,924	71,67	745	0,979	76,5	45	245,06	78,13
1278/17	11,05	19,32	141,414	383,96	745	9,238	64,7	4150	20,77	45,37
1286/17	10,02	16,08	135,161	104,95	433	10,033	42,2	3850	24,92	45,37
1292/17	11,03	9,24	32,710	281,57	413	0,026	186,8	2000	32,40	25,71
1298/17	7,88	2,46	0,962	30,72	1349	0,122	88,2	47	569,03	40,32
1304/17	10,47	14,20	112,550	81,91	505	2,025	29,7	2600	14,12	4,54
1310/17	10,91	11,90	71,190	56,31	500	1,280	40,7	2500	15,78	17,64

Srovnání naměřených výsledků s limitními podle vyhlášky MŽP č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů hodnotami ukázalo, že by většina vzorků byla zařazena do třídy vyluhovatelnosti II. Ale u téměř u všech vzorků byla překročena limitní hodnota konduktivity, což je pravděpodobně způsobeno vyššími koncentracemi naměřených rozpuštěných látek. Proto je většina vzorků

nakonec zařazena do třídy vyluhovatelnosti III. a mohou být uloženy pouze na skládky pro nebezpečný odpad. [31]

6.2 Popeloviny, prchavá hořlavina, fixní uhlík, vlhkost

Obsah popelovin, prchavé hořlaviny, fixního uhlíku a vlhkosti patří mezi důležité parametry při určování charakteristiky paliv, jejich fyzikálních a chemických parametrů stejně jako jejich předpokládané chování v reálných podmínkách ve spalovacích zařízeních. Popeloviny jsou minerální nehořlavé podíly tuhých nebo kapalných látek, hořlavých nebo oxidovatelných a jejich spálením vzniká popel. Prchavá hořlavina vyjadřuje, kolik hořlavých látek unikne ze vzorku paliva jeho zahříváním bez přístupu vzduchu na teplotu 850 °C. Fixní uhlík je zbytkový uhlík v palivu po odstranění vody, prchavé hořlaviny a popela. [103, 104] Analýza obsahu vlhkosti, prchavé hořlaviny, popelovin a fixního uhlíku byla provedena termogravimetrickou (TGA) metodou, která je založena na analyticky přesném vážení přímo v peci.

Tabulka 2: Obsah vlhkosti, prchavé hořlaviny, popelovin a fixního uhlíku

Číslo vzorku	Vlhkost	Prchavá hořlavina	Prchavá hořlavina v sušině	Popeloviny	Popeloviny v sušině	Fixní uhlík	Fixní uhlík v sušině
[%]							
671/17	2,08	24,47	24,99	74,47	76,05	-1,01	-1,04
674/17	4,84	18,79	19,74	52,22	54,88	24,15	25,38
678/17	4,23	11,53	12,04	47,90	50,02	36,34	37,94
694/17	4,15	33,61	35,06	61,88	64,56	0,37	0,38
706/17	5,29	16,92	17,87	57,51	60,72	20,28	21,41
712/17	5,08	14,99	15,80	58,03	61,13	21,90	23,07
715/17	5,03	19,87	20,92	52,36	55,13	22,74	23,95
723/17	0,69	9,06	9,13	90,29	90,92	-0,04	-0,04
733/17	14,82	25,46	29,88	52,43	61,55	7,30	8,56
739/17	4,63	29,97	31,43	56,01	58,73	9,38	9,84
777/17	13,81	26,73	31,01	57,84	67,11	1,63	1,89
783/17	13,28	31,95	36,85	54,61	62,98	0,15	0,17
789/17	2,38	14,25	14,60	61,66	63,17	21,71	22,24
796/17	1,95	27,37	27,91	71,09	72,50	-0,41	-0,41
803/17	2,89	14,80	15,24	51,76	53,29	30,55	31,46
809/17	3,62	27,52	28,55	27,81	28,85	41,06	42,60
816/17	5,05	17,44	18,36	32,47	34,20	45,05	47,44
822/17	3,34	33,58	34,74	39,29	40,65	23,79	24,61
846/17	2,04	11,62	11,86	72,68	74,19	13,67	13,95
869/17	0,78	36,41	36,70	62,91	63,40	-0,1	-0,10
875/17	4,32	20,67	21,60	57,04	59,62	17,97	18,78
881/17	1,58	23,78	24,17	74,34	75,53	0,30	0,30
887/17	5,73	34,00	36,07	26,04	27,62	34,22	36,31
896/17	0,94	9,64	9,73	89,39	90,24	0,03	0,03

Číslo vzorku	Vlhkost	Prchavá hořlavina	Prchavá hořlavina v sušině	Popeloviny	Popeloviny v sušině	Fixní uhlík	Fixní uhlík v sušině
	[%]						
930/17	3,73	48,04	49,90	13,48	14,00	34,76	36,01
947/17	0,38	7,47	7,50	92,10	92,46	0,04	0,04
1035/17	4,58	37,22	39,01	40,39	42,33	17,81	18,66
1043/17	1,80	25,1	25,56	72,59	73,92	0,51	0,52
1049/17	13,16	18,97	21,85	65,20	75,08	2,67	3,07
1069/17	3,03	30,89	31,85	65,93	67,99	0,15	0,15
1097/17	1,96	19,06	19,44	75,42	76,93	3,57	3,64
1103/17	4,07	19,98	20,83	75,42	78,62	0,53	0,55
1127/17	4,13	27,06	28,23	65,15	67,96	3,66	3,81
1133/17	1,23	7,30	7,39	91,42	92,56	0,05	0,05
1141/17	0,35	7,18	7,20	92,44	92,76	0,04	0,04
1147/17	4,60	31,81	33,34	60,78	63,71	2,82	2,95
1159/17	5,37	31,34	33,11	53,19	56,20	10,11	10,69
1177/17	5,14	35,05	36,94	51,73	54,53	8,09	8,52
1217/17	4,72	37,37	39,22	42,60	44,71	15,31	16,07
1228/17	2,12	25,11	25,65	83,23	85,03	-10,46	-10,68
1237/17	1,53	23,75	24,12	85,25	86,57	-10,52	-10,69
1257/17	2,31	34,78	35,60	63,63	65,013	-0,71	-0,73
1270/17	0,65	6,68	6,72	92,57	93,18	0,10	0,10
1278/17	5,76	33,48	35,53	46,35	49,18	14,41	15,29
1286/17	7,26	32,29	34,82	36,52	39,38	23,93	25,80
1292/17	4,19	26,49	27,65	57,52	60,03	11,80	12,32
1298/17	3,41	18,07	18,71	58,67	60,74	19,84	20,54
1304/17	5,55	35,01	37,07	44,42	47,03	15,02	15,91

Jak je vidět v Tabulka 2 tak nejnižší vlhkost byla u vzorku číslo 1141/17 okenní rámy a to hodnota 0,35 %, nejvyšší vlhkost byla u vzorku 733/17 podlahová krytina 14,82 %. Nejnižší obsah prchavé hořlaviny byl naměřen u vzorku 1270/17 FLOT 6,68 %, naopak nejvyšší obsah byl u vzorku 1217/17 mokrý smrk 37,37 %. Obsah prchavé hořlaviny v sušině byl nejnižší u vzorku 1270/17 FLOT 6,72 %, a nejvyšší byl u vzorku 1217/17 mokrý smrk 39,22 %. Nejnižší obsah popelovin byl u vzorku 930/17 buk + PET brikety 13,48 % a nejvyšší u vzorku 1270/17 FLOT 92,57 %. Obsah popelovin v sušině byl nejnižší u vzorku 930/17 buk + PET brikety 14,00 %, nejvyšší u vzorku 1270/17 FLOT 93,18 %. Obsah fixního uhlíku byl nejvyšší naměřen u vzorku 816/17 hnědé uhlí + PET brikety 45,05 % a nejnižší u vzorku 1237/17 hnědé uhlí -10,52 %. Obsah fixního uhlíku v sušině byl nejnižší u vzorku 1237/17 hnědé uhlí -10,68 % a nejvyšší byl naměřen u vzorku 816/17 hnědé uhlí + PET brikety 47,44 %.

6.3 Indexy spékání

Indexy spékání byly vypočteny podle vzorců uvedených v kapitole 4.2. a jejich výsledky jsou zobrazeny v Tabulce 3.

Tabulka 3: Výsledky výpočtů indexů spékání

Vzorek	Index zásada- kyselina	Index SiO ₂	Index IDT	Index AFI	Index ST
	-	[%]	[°C]	[°C]	[°C]
671/17	0,83	22	1020	1105	1297
674/17	0,41	52	994	1061	1144
678/17	0,20	71	958	1033	1119
694/17	3,12	25	1057	1134	1233
706/17	0,30	64	898	968	1135
712/17	0,25	65	1159	1193	1124
715/17	0,23	67	901	986	1120
723/17	0,99	18	1082	1164	1459
733/17	5,03	10	864	994	1527
739/17	4,53	17	928	1010	1276
777/17	2,64	17	908	1024	1414
783/17	26,12	2	1077	1167	1206
789/17	0,45	56	950	1031	1159
796/17	1,75	28	992	1089	1302
803/17	0,68	44	1115	1141	1190
809/17	9,60	16	1100	1140	1275
816/17	0,28	62	1040	1102	1126
822/17	3,80	16	1069	1139	1268
846/17	0,24	68	958	1033	1121
869/17	1,59	17	1184	1234	1302
875/17	0,24	65	996	1058	1123
881/17	1,63	29	959	1064	1316
887/17	3,56	16	1063	1131	1290
896/17	0,79	29	1060	1125	1255
930/17	8,12	20	1140	1195	1247
947/17	0,80	18	1131	1201	1459
1035/17	9,92	10	887	970	1402
1043/17	11,05	9	884	967	1442
1049/17	16,44	3	-	-	1445
1069/17	9,16	10	896	977	1465
1097/17	1,18	36	1158	1212	1257
1103/17	12,77	11	912	990	1301
1127/17	1,76	39	1126	1157	1245
1133/17	3,99	11	1163	1226	1261
1141/17	0,90	20	1012	1104	1438

Vzorek	Index zásada- kyselina	Index SiO ₂	Index IDT	Index AFI	Index ST
	-	[%]	[°C]	[°C]	[°C]
1147/17	10,72	14	964	1031	1264
1159/17	11,20	12	892	974	1316
1177/17	11,95	12	939	1011	1300
1217/17	7,60	13	909	987	1357
1228/17	4,20	11	957	1040	1264
1237/17	4,08	12	999	1076	1256
1257/17	12,27	8	890	972	1414
1270/17	0,21	74	994	1048	1113
1278/17	12,88	11	913	990	1304
1286/17	10,02	12	902	982	1294
1292/17	1,18	21	967	1055	1293
1298/17	0,53	45	966	1015	1149
1304/17	8,97	13	943	1014	1303
1310/17	9,08	11	948	1018	1416

Pro výpočet indexů zásada - kyselina a SiO₂ byl použit přepočtení prvků obsažených v palivu na oxidy. Inkrusty budou s vysokou pravděpodobností tvořit vzorky: 674/17 hnědé uhlí Mostecké, 789/17 papír a letáky, 803/17 hnědé uhlí + papír a letáky a 1298/17 hnědé uhlí Most. U ostatních vzorků je tato pravděpodobnost nižší.

Pomocí výpočtu indexu SiO₂ je zjištěna procentuální pravděpodobnost vzniku inkrustů. Podle výsledků bude inkrusty s malou pravděpodobností tvořit vzorek číslo 1270/17 FLOT, se střední až vysokou pravděpodobností budou inkrusty tvořit vzorky: 678/17 černé uhlí + textil, 712/17 a 715/17 hnědé uhlí Bílina, 846/17 černé uhlí + plasty a 875/17 hnědé uhlí + plasty. Ostatní vzorky by měly tvořit inkrusty s extrémně vysokou pravděpodobností.

Podle indexu IDT se stanovuje počáteční teploty deformace, podle které se určuje pravděpodobnost vzniku inkrustů. Podle těchto výsledků budou s nízkou pravděpodobností inkrusty vzorky: 671/17 dřevotříska, 694/17 buk, 712/17 hnědé uhlí Bílina, 723/17 okenní rámy, 783/17 buk + podlahová krytina, 803/17 hnědé uhlí + papír a letáky, 809/17 buk + PET brikety, 816/17 hnědé uhlí + PET brikety, 822/17 buk + plasty, 869/17 buk + plasty, 887/17 buk + plasty, 896/17 buk + dřevotříska, 930/17 buk + PET brikety, 947/17 okenní rámy, 1097/17 buk + papír a letáky, 1127/17 buk + textil, 1133/17 hnědé uhlí - brikety a 1141/17 okenní rámy. S vysokou pravděpodobností budou inkrusty vytvářet vzorky: 706/17 hnědé uhlí Bílina + textil, 733/17 podlahová krytina, 1035/17 mokrý smrk, 1043/17 mokrý smrk, 1069/17 suchý smrk, 1159/17 mokrý buk a 1257/17 mokrý smrk. Všechny ostatní vzorky budou tvořit inkrusty se střední pravděpodobností.

Podle indexu AFI, který se počítá pomocí indexu IDT, se do kategorie s nízkou pravděpodobností neřadí žádný vzorek, do kategorie se střední pravděpodobností tvorby inkrustů se řadí pouze vzorek 869/17 buk + plasty, do kategorie s vysokou pravděpodobností

patří vzorky: 671/17 dřevotříska, 674/17 hnědé uhlí Mostecké, 694/17 buk, 712/17 hnědé uhlí, 723/17 okenní rámy, 783/17 buk + podlahová krytina, 796/17 buk + papír a letáky, 803/17 hnědé uhlí + papír a letáky, 809/17 buk + PET brikety, 816/17 hnědé uhlí + PET brikety, 822/17 buk + plasty, 869/17 buk + plasty, 875/17 hnědé uhlí + plasty, 881/17 buk + papír a letáky, 887/17 buk + plasty, 896/17 buk + dřevotříska, 930/17 buk + PET brikety, 947/17 okenní rámy, 1097/17 buk + papír a letáky, 1127/17 buk + textil, 1133/17 hnědé uhlí - brikety, 1141/14 okenní rámy, 1237/17 hnědé uhlí - brikety a 1292/17 dřevotříska. Ostatní vzorky jsou zařazeny do kategorie s extrémní pravděpodobností na tvorbu inkrustů.

Podle indexu ST, který je ovšem určený pro výpočet pro biomasu, budou s nízkou pravděpodobností inkrusty tvořit vzorky: 723/17 okenní rámy, 733/17 podlahová krytina, 777/17 hnědé uhlí + podlahová krytina, 947/17 okenní rámy, 1035/17 moký smrk, 1043/17 moký smrk, 1049/17 buk + podlahová krytina, 1069/17 suchý smrk, 1141/17 okenní rámy a 1310/17 suchý smrk. S vysokou pravděpodobností budou inkrusty tvořit vzorky: 674/17 hnědé uhlí Mostecké, 678/17 černé uhlí + textil, 694/17 buk, 706/17 hnědé uhlí Bílina + textil, 712/17 a 715/17 hnědé uhlí Bílina, 783/17 buk + podlahová krytina, 789/17 papír a letáky, 803/17 hnědé uhlí + papír a letáky, 816/17 hnědé uhlí + PET brikety, 846/17 černé uhlí + plasty, 875/17 hnědé uhlí + plasty, 930/17 buk + PET brikety, 1127/17 buk + textil, 1270/17 FLOT a 1298/17 hnědé uhlí Most. Ostatní vzorky se řadí do kategorie se střední pravděpodobností vzniku inkrustů.

7 APLIKACE VÝSLEDKŮ

Kombinované spalování neboli také spaluspalování je v současné době již často používáno zejména pro fosilní paliva nebo biomasu společně s komunálním odpadem, který je však oproti jiným palivům zcela specifický. Problémem je hlavně jeho heterogenní složení, zvýšený obsah vlhkosti a nestálost a různorodost fyzikálních, chemických i energetických vlastností. V reálném provozu lze tyto aspekty upravit pomocí regulace samotného spalování. V současné době probíhá regulace výhřevnosti správným dávkováním paliva nebo jeho předtříděním v prostorech energetického zařízení, kde je tento materiál využíván. Dávkování paliva do spalovacího prostoru se mění v průběhu procesu, jelikož se vlastnosti materiálu mění. Regulovat se dá spalovací proces i zapínám nebo vypínám podpůrného hořáku nebo změnou jeho výkonu. Průběh a kvalitu procesu charakterizuje především teplota spalin a jejich objem. Celý proces se dá regulovat množstvím přiváděného vzduchu. Pokud se ve spalovací komoře vytvoří přebytek spalovacího vzduchu, může se teplota snížit až pod minimální hranici 850 °C, čímž se automaticky spustí podpůrný hořák a energetická náročnost celého procesu se zvyšuje. Optimalizace procesu spaluspalování lze provádět pomocí těchto kroků:

- cíleně sestavená směs paliv a její správné dávkování,
- řízené přivádění spalovacího vzduchu,
- snížení množství spalin,
- rovnoměrná produkce využitelné energie,
- snížení výdajových energetických toků,
- zvýšení termické účinnosti spalovacího zařízení. [32, 33]

V současné době je kombinované spalování vnímáno veřejností negativně, převážně kvůli použití odpadu jako jednoho druhu paliva a je vyvíjen tlak na společnost, aby se takovéto zařízení, stavělo mimo obydlené části. Toto řešení však přináší další technologické problémy, zejména při reálném využití vzniklé energie. Pokud se vzniklá energie používá na výrobu vodní páry, která je dále využita k ohřevu vody, nastává problém s rozvodem této páry pomocí parovodních potrubí do vzdálenějších obydlených částí. Řešením takto vzniklé energie je tedy její transformace na energii elektrickou, kdy není potřeba řešit dostupnost energie a poptávka se v průběhu roku nemění a meziročně stále stoupá.

Na parametrech paliva závisí i tvorba a vlastnosti dalších produktů hoření, jako jsou emise, množství a kvalita popela a další. Další parametry paliva, které ovlivňují průběh hoření, jsou výhřevnost, složení, zrnitost jednotlivých druhů spalovaných materiálů, které by si měly být co nejpodobnější. Homogenita, vlhkost, zápalná teploty, množství spalovacího vzduchu, spalná teplota a teplota v reakční komoře pece, přestup tepla a ztráta tepla do okolí. Všechny tyto faktory významně ovlivňují dobu a kvalitu hoření, množství spáleného materiálu a vzniklé energie. Působí mezi sebou navzájem, proto je nelze posuzovat samostatně. [32, 33]

Výhřevnost se stanovuje na základě elementární analýzy a dále se provádí výpočty pomocí rovnice pro tepelnou bilanci. Problémem při výpočtu výhřevnosti spalované směsi paliva tímto způsobem, může být neupřesnění, v jaké formě jsou zde hořlavé složky paliva

přítomny, což může vést k chybně zvolené metodě energetického využití. Kalorimetrické stanovení spalného tepla s následným dopočtem výhřevnosti je metoda přesnější. Pro kombinované spalování není podstatný jen obsah hořlavých látek, ale také obsah popelovin a jejich složení.

Vzniklý popel je také jedním z hodnotících parametrů pro hodnocení energetického využití odpadu. Popel ze spalování různých směsí nejen odpadních materiálů může obsahovat množství nebezpečných látek jak pro člověka, tak pro životní prostředí. V popelu a popílku se kumulují toxické kovy jako například kadmium, rtuť nebo olovo. Vzhledem k tomu je nutno dobře zanalyzovat vodné výluhy, které jsou uvedeny v Tabulka 1, kdy se na základě výsledků určuje typ sládky kam je možno tento popel nebo škváru bezpečně uložit. Kovové složky popela lze vyseparovat magnetickým separátorem a dále je zpracovat.

Cílem každého energetického zařízení je maximální přenos energie pomocí teplotního gradientu spalin, prostřednictvím vhodných teplotních profilů. Teplota v reakční komoře je velmi důležitým parametrem nejen z hlediska energetické účinnosti zařízení, ale také velmi ovlivňuje množství znečišťujících látek v produktech spalování. Se spalnou teplotou je například úzce spojena tvorba dioxinů. Tato teplota je dána vlastnostmi spalovaného materiálu.

Dalším důležitým faktorem je spalovací vzduch, kdy není možná energetická optimalizace procesu bez regulace množství přiváděného kyslíku do prostoru spalování. Pro odpadní materiály jako jsou komunální odpad, by mělo být množství spalovacího vzduchu v rozmezí 1,5 - 2. Což znamená, že by se mělo pro správný průběh energetického využití dodat do reakční komory až dvojnásobek okysličovadla než je nutné podle stechiometrických výpočtů. [32, 33]

7.1 Identifikace příčin vzniku aglomerátů

V rámci realizovaných výzkumných prací byly vytipovány spalovací jednotky, které by mohly simulovat realizaci spalování v reálných podmínkách. Zejména byly ve výzkumu zohledněny teplotní podmínky, styl přikládání, přívod vzduchu a zejména složení očekávaných paliv. V průběhu testů byly verifikovány podmínky spalování se zaměřením na chování aglomerátů. Z hlediska technického vyly jednoznačně definovány problémy složení paliva s ohledem na vznik aglomerátů. Z tohoto důvodu byly provedeny rovněž následující testy, aby se předcházelo vniknutí aglomerátů, které následně poškozují provozování energetického zařízení.

Pro posouzení zda bude spalovaný materiál tvořit inkrusty slouží především jeho chemické složení, které ovlivňuje teplotu tavitelnosti popela. V Tabulka 4 jsou uvedeny teploty tavení popela ze všech sledovaných materiálů. Spolu s chemickým složením tvorbu těchto nápeků ovlivňuje množství popelovin obsažených v palivu, což je uvedeno v Tabulka 2. Mezi sloučeniny, které nejvýrazněji ovlivňují případnou tvorbu inkrustů patří chlor, který vysoce ovlivňuje životnost tlakových celků prostřednictvím korozního napadání oceli. Mezi sloučeniny, které teplotu tavení popela snižují, patří Fe_2O_3 , FeO , MgO , Na_2O a K_2O , který ovlivňuje viskozitu taveniny. Teplotu tavení popela naopak zvyšují sloučeniny SiO_2 , který tvoří skelnou strukturu, CaO a Al_2O_3 . Tato skutečnost byla rovněž u výsledků zohledněna.

Tabulka 4: Teploty tavení popela pro všechny vzorky

Vzorek	DT deformace	ST měknutí	HT tání	FT tečení
	[°C]			
671/17	1020	1424	1444	1464
674/17	994	1322	1328	1350
678/17	958	1233	1331	1396
694/17	1057	1427	1442	1470
706/17	898	1192	1249	1412
712/17	1159	1310	1329	1361
715/17	901	1309	1328	1357
723/17	1082	1487	1490	1512
733/17	864	1365	1514	1536
739/17	928	1305	1337	1368
777/17	908	1448	1490	1529
783/17	1077	1528	1528	1549
789/17	950	1296	1357	1391
796/17	992	1434	1478	1492
803/17	1115	1237	1247	1254
809/17	1100	»	»	1469
816/17	1040	1334	1352	1369
822/17	1069	1365	1417	1528
846/17	958	1316	1334	1355
869/17	1184	1397	1435	1460

Vzorek	DT deformace	ST měknutí	HT tání	FT tečení
	[°C]			
875/17	996	1296	1305	1320
881/17	959	1473	1484	1520
887/17	1063	1346	1401	1438
896/17	1060	1332	1385	1416
930/17	1140	1364	1415	1437
947/17	1131	1473	1481	1500
1035/17	887	»	»	1549
1043/17	884	»	»	1549
1069/17	896	»	»	1549
1097/17	1158	1414	1426	1438
1103/17	912	»	»	1549
1127/17	1126	1273	1282	1290
1133/17	1163	1373	1480	1549
1141/17	1012	1465	1471	1475
1147/17	964	»	»	1500
1159/17	892	»	»	1549
1177/17	939	»	»	1549
1217/17	909	»	»	1549
1228/17	957	1361	1370	1400
1237/17	999	1365	1385	1414
1257/17	890	»	»	1549
1270/17	994	1212	1262	1307
1278/17	913	»	»	1549
1286/17	902	»	»	1549
1292/17	967	1323	1406	1441
1298/17	966	1185	1210	1230
1304/17	943	»	»	1549
1310/17	948	»	»	1549

Vysvětlivky: » plynulé roztečení, není možné rozeznat jednotlivé charakteristické tvary během tavení popela

Teploty tavení popela uvedené v Tabulka 4, především počáteční teplota deformace nejsou nijak vysoké, pokud vezeme v úvahu, že spalovny komunálního odpadu i ZEVO spalují materiál při teplotě minimálně 800 °C a například cementárny při teplotách až 1500 °C. Při těchto podmínkách je velmi pravděpodobné, že zkoumané materiály se budou roztékat a mohou tvořit inkrusty. Nejvyšších teplot tečení FT 1549 °C dosahovaly vzorky 783/17 buk + podlahová krytina, 1035/17 a 1043/17 mokrý smrk, 1069/17 suchý smrk, 1103/17 suchý buk, 1133/17 hnědé uhlí - brikety, 1159/17 a 1177/17 mokrý buk, 1217/17 a 1257/17 mokrý smrk, 1278/17 mokrý buk, 1286/17 suchý buk, 1304/17 suchý buk a 1310/17 suchý smrk. Z výše uvedeného plyne, že pro snížení množství tvorby inkrustů existuje pouze jedna možnost a tou je složení paliva, tomuto procesu nelze zcela předejít. Současně je potřeba si uvědomit, že v centru ložiska spalování je teplota vyšší než požadovaná teplota na konci spalování, např. 850 °C.

8 ZÁVĚR

Hlavním cílem disertační práce bylo posouzení vlivu složení komunálního odpadu na tavitelnost popela s ohledem na provozování energetického zařízení, zejména s ohledem na využití kombinovaného spalování paliv. Pro dosažení komisi odsouhlaseného cíle byla vytipována vhodná spalovací zařízení a složení paliv pro testování, které by umožnilo zohlednit reálné podmínky. V rámci práce byly rovněž sledovány základní vlastnosti paliv a následně byly realizovány chemické a termochemické analýzy popela z různých nejen odpadních materiálů a jejich kombinací. Bylo použito 49 vzorků popela. Prováděné analýzy se týkaly výhřevnosti, vlhkosti, obsahu popelovin, prchavé hořlaviny a fixního uhlíku, dále byl proveden vodný výluh a samozřejmě byly vzorky popela taveny za vzrůstající teploty. Následně byly ještě vypočteny indexy spékání pomocí pěti různých metod: index zásada - kyselina, SiO_2 , IDT, AFI a ST.

Analýza vodného výluhu byla provedena pomocí deseti ukazatelů: pH, konduktivita, $\text{KNK}_{4,5}$, Cl^- , $(\text{SO}_4)^{2-}$, $(\text{PO}_4)^{3-}$, Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} . U vodného výluhu je vhodné, aby dosažené výsledky koncentrací byly co nejnižší. Podle vyhlášky MŽP č. 294/2005 Sb. podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady, ve znění pozdějších předpisů jsou limitní koncentrace pro vodný výluh z odpadů. Tyto limitní koncentrace řadí vyluhované odpady do jedné ze tří, resp. čtyř tříd vyluhovatelnosti. Z hlediska hodnoty $\text{pH} = 5,9$ je nejvhodnější vzorek 777/17 hnědé uhlí a podlahová krytina. Hodnota konduktivity $1,28 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-2}$ byla naměřena u vzorku 678/17 černé uhlí a textil. Většina vzorků ale měla konduktivitu naměřenou nad hodnotou $6,0 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-2}$, což je z hlediska zařazení do tříd vyluhovatelnosti vymezuje do třídy III. a mohou být ukládány pouze na skládky pro nebezpečný odpad. Kyselinová neutralizační kapacity při hodnotě $\text{pH} 4,5$ neboli $\text{KNK}_{4,5} = 0,962 \text{ mmol} \cdot \text{l}^{-1}$ byla naměřena stejná hned u tří vzorků 783/17 buk + podlahové krytiny, 1237/17 hnědouhelné brikety a 1298/17 hnědé uhlí. Hodnota chloridového anionu $23,04 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ byla naměřena u vzorku 1159/17 mokrý buk. Nulová koncentrace síranového anionu byla naměřena u vzorků 783/17 buk + podlahové krytiny, 1049/17 buk + podlahové krytiny a 1097/17 buk + papír a letáky. Fosforečnanový anion měl stejnou koncentraci $0,001 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ u tří vzorků 706/17 hnědé uhlí + textil, 712/17 hnědé uhlí a 715/17 hnědé uhlí. Koncentrace sodíkového kationu $11,8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ byla naměřena u vzorku 789/17 papír a letáky. Draslíkový kation měl koncentraci $15 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ naměřenou u vzorku 789/17 papír a letáky. Vápníkový kation měl stejnou koncentraci $8,31 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ u dvou vzorků 1159/17 mokrý buk a 1177/17 mokrý buk. Koncentrace hořčíkového kationu byla naměřena $4,51 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ u vzorku 1304/1 suchý buk.

Obsah popelovin, prchavé hořlaviny, fixního uhlíku a vlhkosti patří mezi důležité parametry při určování charakteristiky paliv. Také zde je vhodné, aby obsah jednotlivých parametrů ve vzorcích byl co nejnižší, kromě hodnoty prchavé hořlaviny a obsahu fixního uhlíku, který je řazen mezi spalitelné látky, které hoří na vzduchu, ale nehoří v dusíkové atmosféře. Vlhkost 0,35 % byla naměřena u vzorku 1141/17 okenní rámy. Obsah prchavé hořlaviny 37,37 % stejně jako obsah prchavé hořlaviny v sušině 39,22 % byl naměřen u vzorku 1217/17 mokrý smrk. Obsah popelovin 13,48 % byl stejně jako obsah popelovin v sušině 14,00 % naměřen u vzorku 930/17 buk + PET brikety. Obsah fixního uhlíku 45,05 %

byl stejně jako obsah fixního uhlíku v sušině 47,44 % naměřen u vzorku 816/17 hnědé uhlí + PET brikety.

Pomocí výpočtu indexů spékavosti je zjišťována pravděpodobnost s jakou budou paliva v reálných podmínkách spalovacích zařízení tvořit nežádoucí nápeky na teplosměnných plochách. Podle indexu zásada - kyselina budou s malou pravděpodobností tvořit nápeky všechny vzorky mimo: 674/17 hnědé uhlí Mostecké, 789/17 papír a letáky, 803/17 hnědé uhlí + papír a letáky a 1298/17 hnědé uhlí Most. Podle výsledků výpočtů indexu SiO_2 bude s malou pravděpodobností tvořit nápeky pouze vzorek 1270/17 FLOT. Podle indexu IDT budou nápeky s malou pravděpodobností tvořit vzorky 671/17 dřevotříska, 694/17 buk, 712/17 hnědé uhlí Bílina, 723/17 okenní rámy, 783/17 buk + podlahová krytina, 803/17 hnědé uhlí + papír a letáky, 809/17 buk + PET brikety, 816/17 hnědé uhlí + PET brikety, 822/17, 869/17 a 887/17 buk + plasty, 896/17 buk + dřevotříska, 930/17 buk + PET brikety, 947/17 okenní rámy, 1097/17 buk + papír a letáky, 1127/17 buk + textil, 1133/17 hnědé uhlí - brikety a 1141/17 okenní rámy. Podle výsledků výpočtu indexu AFI se do kategorie s malou pravděpodobností vzniku nápeků neřadí žádný vzorek. A podle výsledků indexu ST, což je index teploty měknutí budou s malou pravděpodobností tvořit nápeky vzorky 723/17 okenní rámy, 733/17 podlahová krytina, 777/17 hnědé uhlí + podlahová krytina, 947/17 okenní rámy, 1035/17 mokrý smrk, 1043/17 mokrý smrk, 1049/17 buk + podlahová krytina, 1069/17 suchý smrk, 1141/17 okenní rámy a 1310/17 suchý smrk.

U teploty tavení popela je žádané, aby bylo co nejvyšší. Se zvyšující se teplotou klesá pravděpodobnost, že se popel bude napékat na části spalovacího zařízení. Z tohoto důvodu se jako nejvhodnější jeví vzorky 783/17 buk + podlahová krytina, 1035/17 a 1043/17 mokrý smrk, 1069/17 suchý smrk, 1103/17 suchý buk, 1133/17 hnědé uhlí - brikety, 1159/17 a 1177/17 mokrý buk, 1217/17 a 1257/17 mokrý smrk, 1278/17 mokrý buk, 1286/17 suchý buk, 1304/17 suchý buk a 1310/17 suchý smrk, které shodně dosahovaly hodnot teploty tečení FT 1549 °C.

Po vyhodnocení výsledků všech provedených analýz byl jako nejvhodnější palivo zvolen vzorek **783/17 buk + podlahová krytina**, následovaly vzorky 1141/17 okenní rámy, 1159/17 mokrý buk, 712/17 hnědé uhlí Bílina, 723/17 okenní rámy, 777/17 hnědé uhlí + podlahová krytina, 789/17 papír a letáky, 816/17 hnědé uhlí + PET brikety, 930/17 buk + PET brikety, 947/17 okenní rámy, 1035/17 a 1043/17 mokrý smrk, 1049/17 buk + podlahová krytina, 1069/17 suchý smrk, 1097/17 buk + papír a letáky, 1133/17 hnědé uhlí - brikety, 1177/17 mokrý buk, 1217/17 mokrý smrk, 1298/17 hnědé uhlí Most, 1304/17 suchý buk, 1310/17 suchý smrk.

Velmi cenné se jeví získání informací z hlediska složení vhodných paliv, zejména na bázi biomasy, případně uhlí. Právě taková směs je očekávána jako nejpravděpodobnější při kombinovaném spalování. Rovněž dochází ke zmírnění negativního dopadu vytržidných odpadů v rámci kombinovaného spalování. Na základě získaných vlastností vzniklých směsí lze předpokládat, že budou minimalizovány dopady na teplosměnné plochy a aglomeráty ze spalovacího prostoru, zejména strusky.

Ve skutečnosti je však problém s dalšími příměsemi v palivech z hlediska emisních limitů. Tato část však již nebyla součástí této doktorské práce, může být však předmětem dalšího výzkumu

8.1 Přínos pro vědní obor

Předložená práce dokázala, že na základě chemických a termochemických analýz, kterými byly mimo jiné obsah vlhkosti, prchavé hořlaviny, fixního uhlíku a popelovin, vodný výluh, výpočty indexu tavitelnosti popela a v neposlední řadě samotné určení tavitelnosti popela při zvyšující se teplotě, lze určit z nabízených vzorků paliv to nejvhodnější složení směsi paliva, které by se mohlo používat při kombinovaném spalování s minimalizací negativních dopadů na energetické zařízení a jeho provoz.

8.2 Přínos pro praxi

Tato práce nabízí ucelený přehled o chování použitých materiálů nejen v ZEVO, ale také v jiných zařízeních pro energetické využití odpadů. Je zde uvedeno téměř padesát různých, převážně odpadních, materiálů a jejich směsí, které byly vystaveny několika rozdílným analýzám. Na základě výsledků byly tyto materiály posouzeny z hlediska vhodnosti jejich použití pro energetické využití. Podle shrnutí jednotlivých vlastností lze vybrat nejvhodnější kombinace materiálů tak, aby při jejich použití v reálných podmínkách nedocházelo k poškození energetických zařízení například vznikem inkrustů.

8.3 Doporučení na další výzkum

Další výzkum by mohl být zaměřen jednak na prohloubení poznatků chování různých paliv, například směsný komunální odpad z různých typů zástaveb a v průběhu všech období roku, v reálných podmínkách v energetických zařízeních. Kombinace dalších druhů paliv, například bylinná biomasa, nebo jejich promíchání v jiném poměru, zde jsou možnosti velmi otevřené. A dále by se mohl další výzkum ubírat směrem zjišťování principů udržování popelu na stěnách spalovacích zařízení.

9 CONCLUSIONS

The main target of the dissertation was to judge the influence of the composition of municipal waste on the ash melting with regard to the operation of the energy equipment, especially with regard to the use of combined combustion of fuels. In order to achieve the agreed targets, appropriate combustion equipment and fuel composition for testing were selected to allow for real conditions to be taken into account. The basic properties of fuels were also monitored and chemical and thermochemical analyzes of ash from various waste materials and their combinations were carried out. 49 ash samples were used. The analyzes performed related to calorific value, volatile, ash content, volatile flammable matter and fixed carbon, water extraction, and of course ash samples were melted at increasing temperatures. Consequently, the cessation indexes were calculated using five different methods: the base-acid index, SiO₂, IDT, AFI and ST."

An aqueous extract analysis was performed using ten indicators: pH, Conductivity, KNK_{4,5}, Cl⁻, (SO₄)²⁻, (PO₄)³⁻, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺. In aqueous extraction, it is advisable to achieve as low a concentration as possible. According to the Decree of the Ministry of the Environment No. 294/2005 Coll. on conditions for the disposal of waste at landfills and their use on the surface of the land and amending Decree No. 383/2001 Coll., on waste management details, as amended, are the limit values for waste water leachate. These limit concentrations classify leached wastes into one of three, respectively. four classes of leachability. In terms of pH = 5,9, sample 777/17 brown coal and floor coverings are the most suitable. Conductivity values of 1,28 mS · cm⁻² were measured for sample 678/17 black coal and textiles. Most samples, however, had a conductivity measured above 6,0 mS · cm⁻², which in terms of classification into classes of leachability is defined in Class III. and may only be stored in hazardous waste landfills. Acid neutralizing capacity at pH 4.5 or KNK_{4,5} = 0.962 mmol · l⁻¹ was measured the same for three samples of 783/17 beech + floor coverings, 1237/17 brown coal briquettes and 1298/17 brown coal. The chloride anion value of 23,04 mg · l⁻¹ was measured in a 1159/17 wet beech sample. The zero sulphate anion concentration was measured for samples 783/17 beech + floor coverings, 1049/17 beech + floor coverings and 1097/17 beech + paper and leaflets. The phosphate anion had the same concentration of 0,001 mg · l⁻¹ in three samples of 706/17 brown coal + textiles, 712/17 brown coal and 715/17 brown coal. The sodium cation concentration of 11,8 mg · l⁻¹ was measured on sample 789/17 paper and leaflets. The potassium cation had a concentration of 15 mg · l⁻¹ as measured on sample 789/17 paper and leaflets. The calcareous cation had the same concentration of 8,31 mg · l⁻¹ in two samples of 1159/17 wet beech and 1177/17 wet beech. Magnesium cation concentration was measured at 4,51 mg · l⁻¹ in sample 1304/17 dry beech.

The ash content, volatile flammability, fixed carbon and moisture content are important parameters when determining fuel characteristics. Also, it is advisable that the content of the individual parameters in the samples is as low as possible, except for the volatile flammability and the fixed carbon content, which is among the combustible substances that burn in the air but do not burn under a nitrogen atmosphere. A moisture of 0,35 % was measured for sample 1141/17 window frames. The content of volatile flammability 37,37 % as well as the content of volatile flammable substances in the dry

matter 39,22 % was measured in sample 1217/17 wet spruce. The ash content of 13,48 % was as well as the ash content in the dry matter of 14,00 % measured in the sample 930/17 beech + PET briquettes. The fixed carbon content was 45,05 % as well as the 47,44 % solid carbon content in sample 816/17 brown coal + PET briquettes.

By calculating the sintering indexes, the likelihood of fuel combustion in the real conditions of the combustion plants generating undesirable effects on the heat exchange surfaces is determined. According to the acid-base principle, all samples except for: 674/17 Mostecké brown coal, 789/17 paper and leaflets, 803/17 brown coal + paper and leaflets and 1298/17 brown coal Bridge. According to the results of the calculations of the SiO_2 index, only a sample of 1270/17 FLOTs will be very likely to be generated. According to the IDT index, the probabilities are low probability of samples 671/17 chipboard, 694/17 beech, 712/17 brown coal Bílina, 723/17 window frames, 783/17 beech + floor cover, 803/17 brown coal + paper and leaflets, 809/17 beech + PET briquettes, 816/17 brown coal + PET briquettes, 822/17, 869/17 and 887/17 beech + plastics, 896/17 beech + chipboard, 930/17 beech + PET briquettes, 947 / 17 window frames, 1097/17 beech + paper and leaflets, 1127/17 beech + textiles, 1133/17 brown coal - briquettes and 1141/17 window frames. According to the results of the calculation of the AFI index, no sample is placed in the category with low probability of the occurrence of stones. And according to the results of the ST index, which is the softening point index, it is unlikely that samples of 723/17 window frames, 733/17 floor coverings, 777/17 brown coal + floor coverings, 947/17 window frames, 1035/17 wet spruce, 1043/17 wet spruce, 1049/17 beech + floor coverings, 1069/17 dry spruce, 1141/17 window frames and 1310/17 dry spruce.

At ash melting temperature, it is desired that the value is as high as possible. As the temperature rises, the likelihood that the ash will flow into parts of the combustion plant or also affect the heat exchange surfaces will decrease. For this reason, samples of 783/17 beech + floor cover, 1035/17 and 1043/17 wet spruce, 1069/17 dry spruce, 1103/17 dry beech, 1133/17 brown coal - briquettes, 1159/17 and 1177/17 wet beech, 1217/17 and 1257/17 wet spruce, 1278/17 wet beech, 1286/17 dry beech, 1304/17 dry beech and 1310/17 dry spruce, which consistently reached FT 1549 °C.

After evaluating the results of all the analyzes carried out, 783/17 beech + floor cover sample was selected as the most suitable fuel, followed by samples 1141/17 window frames, 1159/17 wet beech, 712/17 brown coal Bílina, 723/17 window frames, 777/17 brown coal + floor coverings, 789/17 paper and leaflets, 816/17 brown coal + PET briquettes, 930/17 beech + PET briquettes, 947/17 window frames, 1035/17 and 1043/17 spruce spruce, 1049/17 beech + floor covering, 1069/17 dry spruce, 1097/17 beech + paper and leaflets, 1133/17 brown coal - briquettes, 1177/17 wet beech, 1217/17 wet spruce, 1298/17 brown coal Bridge, 1304/17 dry beech, 1310/17 dry spruce.

It is very valuable to obtain information on the composition of suitable fuels, especially on the basis of biomass or coal. It is precisely such a mixture that is expected to be most likely in combined combustion. Also, the negative impact of sorted waste in the combined combustion process is mitigated. On the basis of the acquired properties of the

resulting mixtures, it can be assumed that impacts on the heat exchange surfaces and agglomerates from the combustion chamber, especially the slag, will be minimized.

In fact, there is a problem with other fuel additives in terms of emission limits. However, this part was no longer part of this doctoral thesis, but it could be the subject of further research

9.1 Contribution for scientific discipline

The presented work proved that on the basis of chemical and thermochemical analyzes, which included, among other things, the content of moisture, volatile flammables, solid carbon and asphalt, water leach, calculations of the melting index of the aspect and last but not least the determination of asphalt fusion at rising temperature can be determined from the offered samples fuel for the most appropriate composition of a fuel mixture that can be used in combined combustion with minimizing negative impacts on the power plant and its operation.

9.2 Contribution for practice

This work offers a comprehensive overview of the behavior of used materials not only in ZEVO but also in other waste energy utilization facilities. There are about fifty different, mostly waste, materials and their mixtures that have been subjected to several different analyzes. Based on the results, these materials were assessed for their suitability for energy use. According to the summary of the individual properties, the most suitable combinations of materials can be selected so that, in their use under real conditions, energy equipment can not be damaged by the formation of incrustations.

9.3 Recommendation for further research

Further research could be aimed at enhancing knowledge of the behavior of different fuels, such as mixed municipal waste from different types of closures and throughout the year, under realistic conditions in power plants. Combining other types of fuels, such as herbal biomass, or mixing them in a different ratio, here are possibilities very open. Furthermore, further research could be undertaken to determine the principles of ash maintenance on the walls of combustion plants.

10 POUŽITÁ LITERATURA

1. Komunální odpady. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: MŽP, 2015 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/komunalni_odpady
2. ČR. *Vyhláška 93/2016 Sb. o Katalogu odpadů*. In: Praha: MŽP, 2016, 38/2016. Dostupné také z: https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/0BFE53E10EC910E2C12580A7004BBDA1/%24file/V%2093_2016.pdf
3. Seznam nebezpečných odpadů. *EAgri: Ministerstvo zemědělství* [online]. Praha: MZ, 2017 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://eagri.cz/public/web/mze/legislativa/ostatni/100313701.html>
4. Jak správně třídít ostatní odpady: Velkoobjemový odpad. *Jaktridit.cz* [online]. Praha: EkoKom, 2017 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://www.jaktridit.cz/cz/trideni/jak-spravne-tridit---dalsi-odpad/velkoobjemovy-odpad>
5. Plán odpadového hospodářství. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: MŽP, 2014 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/plan_odpadoveho_hospodarstvi_cr
6. Plán odpadového hospodářství České republiky pro období 2015 - 2024. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: MŽP, 2014 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/\\$FILE/O ODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/poh_cr_prislusne_dokumenty/$FILE/O ODP-POH_CR_2015_2024_schvalena_verze_20150113.pdf)
7. Nakládání s komunálními odpady. *Český statistický úřad* [online]. Praha: ČSÚ, 2017 [cit. 2018-01-09]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/documents/10180/46324992/280020-1707.pdf/36de0fd1-5e08-48b9-9e98-070719cefbfe?version=1.0>
8. Nařízení Evropského parlamentu a Rady (ES) o přepravě odpadů. *Ministerstvo životního prostředí* [online]. Praha: MŽP, 2012 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/narizeni_epes_odpady
9. ČR. *Vyhláška č. 294/2005 Sb., o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady*. In: Praha: MŽP, 2005, číslo 1. Dostupné také z: [https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/96F060C6A3D87823C125708F00317B16/\\$file/V%20294_2005.pdf](https://www.mzp.cz/www/platnalegislativa.nsf/96F060C6A3D87823C125708F00317B16/$file/V%20294_2005.pdf)
10. Skládkování. *Vítejte na Zemi* [online]. Praha: Cenia, 2013 [cit. 2018-02-15]. Dostupné z: <http://www.vitejtenazemi.cz/cenia/index.php?p=skladkovani&site=odpady>
11. Co je ZEVO. *Skupina ČEZ* [online]. Plzeň: ČEZ, 2018 [cit. 2018-04-16]. Dostupné z: <https://www.cez.cz/cs/zevo/co-je-zevo.html>
12. ČSN ISO 540. *Uhlí a koks - Stanovení tavitelnosti popela*. Praha: Český normalizační institut, 2009.
13. ČSN P CEN/TS 15370-1 (838227): *Tuhá biopaliva - Metoda pro stanovení teploty tání popela - Část 1: Metoda stanovení charakteristických teplot*. Praha: Český normalizační institut, 2007.
14. KUBANT, J. a M. LUSTIGOVÁ. *Hodnocení analýz tuhých paliv*. Praha: ÚpVVP, 2014.

15. PŁAZA, P. P. The Development of a Slagging and Fouling Predictive Methodology for Large Scale Pulverised Boilers Fired with Coal/Biomass Blends. EU: Delft-Warsaw, 2013.
16. FOLGUERAS, M.B., M. ALONSO a J.R. FOLGUERAS. Effect of sludge addition to coal on Na, K and S volatilisation in ashing process and ash fusibility. *Fuel Processing Technology*. 2015, (138), 714-723.
17. MA, T., CH. FAN, L. HAO, S. LI, W. SONG a W. LIN. Fusion characterization of biomass ash. *Thermochimica Acta*. 2016, (638), 1-9.
18. HORÁK, J., JANKOVSKÁ, Z., BRANC, M., STRAKA, F., BURYAN, P., KUBESA, P., HOPAN, F., KRPEC, K. *Problematika stanovení charakteristických teplot tavitelnosti popela biomasy*. Chemické listy. 2013, č. 107, s. 502-509.
19. LI, Y., L. LIU, F. XIAO a L. SUN. Effective temperature for predicting permanent deformation of asphalt pavement. *Construction and Building Materials*. 2017, (156), 871-879.
20. HAYKIRI-ACMA, H., S. YAMAN a S. KUCUKBAYRAK. Effect of biomass on temperatures of sintering and initial deformation of lignite ash. *Fuel*. 2010, 10(89), 3063-3068.
21. GARCIA-MARAVAR, A., J. MATA-SANCHEZ, M. CARPIO, J.A. PEREZ-JIMENE a W. LIN. Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *Journal of the Energy Institute*. 2017, 2(90), 214-228.
22. DU, S., H. YANG, K. QIAN, X. WANG a H. CHEN. Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash. *Fuel*. 2014, (117 B), 1281-1287.
23. PACHECO DA COSTA, T., P. QUINTEIRO, L.A. DA CRUZTARELHO, L. ARROJA a A.C. DIAS. Environmental impacts of forest biomass-to-energy conversion technologies: Grate furnace vs. fluidised bed furnace. *Journal of Cleaner Production*. 2018, (171), 153-162.
24. YIN, Ch., L.A. ROSENDAHL a S.K. KÆR. Grate-firing of biomass for heat and power production. *Journal of Cleaner Production*. 2008, (34), 725-754.
25. Energetika - Energetické využití komunálního odpadu. *Magistrát města Plzeň* [online]. Plzeň: MMP, 2017 [cit. 2018-01-17]. Dostupné z: https://energetika.plzen.eu/Files/energetika/koncepcni_dokumenty/ostatni_dokumenty/Energetickypotencialodpadu.pdf
26. HU, X., J. XU, M. WU, J. XING, W. BI, K. WANG, J. MA a X. LIU. Effects of biomass pre-pyrolysis and pyrolysis temperature on magnetic biochar properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017, (127), 196-202.
27. Karbonizační zbytek. *OptiLube* [online]. Praha: OL, 2018 [cit. 2018-02-21]. Dostupné z: http://www.optilube.cz/oleje-maziva/term_149
28. ČSN 75 6760: *Vnitřní kanalizace*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.
29. ŠEJVL, R.: *Energie z odpadů II*. Biom.cz [online]. 2013-04-01 [cit. 2018-02-21]. Dostupné z WWW: <<https://biom.cz/cz/odborne-clanky/energie-z-odpadu-ii>>. ISSN: 1801-2655.

30. ŘÍHOVÁ AMBROŽOVÁ, J. *Aplikovaná a technická hydrobiologie*. Vyd. 2. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2003. ISBN 80-7080-521-8.
31. Vyhláška č. 294/2005 Sb. o podmínkách ukládání odpadů na skládky a jejich využívání na povrchu terénu a změně vyhlášky č. 383/2001 Sb., o podrobnostech nakládání s odpady. In: Praha: MŽP, 2005, ročník 2005, 105 (21. 7. 2005), číslo 294.
32. Obroučka, K., Moravcová, T. Tepelná práce spalovací pece na komunální odpad. Dílčí zpráva k řešení projektu v programu MPO ev. č. 2A-3TP 1/087, VŠB-TU, Ostrava, 2011.
33. MORAVCOVÁ, T. Tepelná práce spalovacích pecí na komunální odpad. Ostrava, 2012. Disertační práce. VŠB-TUO. Vedoucí práce Prof. Ing. Karel Obroučka, CSc.

11 SEZNAM TABULEK A OBRÁZKŮ

Tabulka 1: Vodný výluh	17
Tabulka 2: Obsah vlhkosti, prchavé hořlaviny, popelovin a fixního uhlíku	19
Tabulka 3: Výsledky výpočtů indexů spékání.....	21
Tabulka 4: Teploty tavení popela pro všechny vzorky	26
 Obrázek 1: Hierarchie odpadů [11]	 9

12 VLASTNÍ PUBLIKACE K TÉMATU DISERTAČNÍ PRÁCE

Seznam příspěvků ve sbornících konferencí:

1. ŽURKOVÁ, K., K. KRYŠTOFOVÁ, H. RACLAVSKÁ, H. ŠKROBÁNKOVÁ. Influence of Refused Glass on Thermal Properties of Municipal Waste. Applied Mechanics and Materials. Vol. 832. Pages 23-30, 2016, ISBN 978-3-0357-1015-1

Články uvedené v databázi Scopus:

1. KRYŠTOFOVÁ, K., H. RACLAVSKÁ, H. ŠKROBÁNKOVÁ a V. SASSMANOVÁ. Fuels and their influence on the properties of ash in local boilers. In: IOP conference series: Earth and environmental science. Volume 92. Bristol: IOP Publishing, 2017. s. 012031. ISBN 0-000-00000-0.
2. ŽURKOVÁ, Kateřina, Karla KRYŠTOFOVÁ, Helena RACLAVSKÁ a Hana ŠKROBÁNKOVÁ. The possibility of utilization of separated municipal waste as solid alternative fuel. In: Engineering Sciences and Production Management 2015 : international scientific conference : book of abstracts : medzinárodná vedecká konferencia : zborník abstraktov: 16.4.-17.4.2015, Vysoké Tatry, Tatranská Štrba. Košice: Podnikovohospodárska fakulta so sídlom v Košiciach, Ekonomická univerzita v Bratislavě, 2015. s. 337–342. ISBN 978-80-971555-4-4
3. ŠAFÁŘ, M., H. RACLAVSKÁ, K. KRYŠTOFOVÁ, K. RACLAVSKÝ, M. KUCBEL, B. ŠVÉDOVÁ a D. MATÝSEK. Problems with utilisation of engineering wood for energy purposes. In: Proceedings of the 2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2017. Ostrava: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. s. nestránkováno. ISBN 978-1-5090-6405-2.

ŽIVOTOPIS

OSOBNÍ ÚDAJE

Jméno, příjmení, titul: Ing. Karla Kryštofová
Datum narození: 7. 2. 1990
Trvalé bydliště: Skřipov 116, 747 45
Kontaktní telefon: +420 732 32 89 30
E-mail: KarlaKrystofova@seznam.cz

DOSAŽENÉ VZDĚLÁNÍ

2014 - dosud VŠB-TUO, Obor Energetické stroje a zařízení, (Obnovitelné zdroje energie, Biomasa a odpady pro energetické využití, Geoekologie), disertační práce: Výzkum vlivu skladby komunálního odpadu využívaného v ZEVO na tavitelnost popela

2012 - 2014 VŠB-TUO, Obor Environmentální inženýrství, ukončeno státní závěrečnou zkouškou - **titul Ing.**, (inženýrská ekologie, odpadové hospodářství, oceňování antropogenních vlivů), diplomová práce: Vliv chemického složení popela z biomasy na tavitelnost

2009 - 2012 VŠB-TUO, Obor Environmentální inženýrství, ukončeno státní závěrečnou zkouškou - **titul Bc.**, (ekologie, úvod do odpadového hospodářství, ochrana vod), bakalářská práce: Technologické možnosti odstraňování sinic a řas

2001 - 2009 Matiční gymnázium Ostrava, Obor Všeobecné vzdělání, ukončeno maturitní zkouškou (český jazyk, anglický jazyk, dějepis, základy společenských věd)

PRACOVNÍ ZKUŠENOSTI

2015 - dosud Centrum energetických jednotek pro využití netradičních zdrojů energie, Junior researcher

CURRICULUM VITAE

PERSONAL INFORMATION

Ing. Karla Kryštofová

7. 2. 1990

Skřipov 116, 747 45 Skřipov (Czech Republic)

+420 732 32 89 30

KarlaKrystofova@seznam.cz

EDUCATION

- | | |
|----------------|--|
| 2014 - present | Ph.D. student of VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Power Engineering, (Renewable Energy, Biomass and waste for energy use, Geoecology), Dissertation thesis: The research of municipal waste composition utilized by technology of waste-Zevo on ash melting point |
| 2012 - 2014 | Master's degree of VŠB- Technical University of Ostrava, Faculty of Mining and Geology, Institute of Environmental Engineering - title Ing. , (Engineering ecology, Waste management, Environmental impact assessment). Diploma thesis: Effect of biomass ash chemical composition on melting |
| 2009 - 2012 | Bachelor's degree of VŠB- Technical University of Ostrava, Faculty of Mining and geology, Institute of Environmental Engineering - title Bc. , (Ecology, Introduction to waste management, Water protection). Bachelor thesis: Technological options for removing cyanobacteria and algae |
| 2005 - 2009 | Matiční high school - general education, Completed by graduation (Czech Language, English Language, History, Social Sciences) |

WORK EXPERIENCE

2015 - present Junior researcher of the centre Energy Units for Utilization of non Traditional Energy Sources VŠB-TU Ostrava